

ОСОБЛИВОСТІ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ ОБОЛОНОК РЕАКТОРІВ НА ШВИДКИХ НЕЙТРОНАХ

П.С. Шльонський, Фенг Гао

Liaoning Xin Huayang Weiye Equipment Manufacturing company Ltd №1 Road, Tieling high-tech industrial development zone, Liaoning province, China. E-mail: pshlonsk@hmtclad.com

Проведено дослідження можливості зварювання вибухом пластин і дисків із дисперсно-зміцненої оксидами низькопластичної сталі між собою. Для попередження появи тріщин на поверхні пластин застосовували низькотемпературний (до 200 °С) підігрів пластини яка метається. У широкому діапазоні параметрів зварювання вибухом з прив'язкою до вікна зварюваності показано мікроструктуру отриманого з'єднання для дисків завтовшки 2 мм і діаметром 50 мм, які були вварені за допомогою лазерного зварювання у пластини з вуглецевої і нержавкої сталей. Проведено випробування міцності на відрив для отриманих з'єднань, вдалося досягти міцності з'єднання 75 % від міцності основного металу. Виконано зварювання вибухом пластин розміром 100×50×3 мм, границя зони з'єднання має типову для зварювання вибухом хвилясту форму. За допомогою енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії визначено хімічний склад включень у зоні з'єднання, встановлено, що у зоні з'єднання наявні силікати. Показано, що застосування низькотемпературного підігріву дозволяє зварювати пластини з ODS сталі за допомогою енергії вибуху. Бібліогр. 14, табл. 3, рис. 9.

Ключові слова: ODS сталь, зварювання вибухом, вікно зварювання, низькотемпературний підігрів, мікроструктура

Актуальність. Мета роботи. Особливістю атомної енергетики завжди була потреба у нових конструкційних матеріалах для ядерних енергетичних установок.

Нанотехнології у цій галузі застосовувалися ще доти, коли почали використовувати приставку «нано», оскільки створені паливні і конструкційні матеріали багато в чому ґрунтувалися на якісній зміні властивостей матеріалів під час переходу в нанометричний діапазон розмірів [1, 2].

Області застосування нанотехнологій в атомній енергетиці дуже різноманітні та охоплюють практично все коло проблем ядерного паливного циклу та циклу, який створюється, – термоядерного. Однією з них є створення нанодисперсних матеріалів конструкційного і функціонального призначення, а саме дисперсно-зміцнених оксидами (Oxide Dispersion Strengthened steel, ODS сталь) феритно-мартенситних сталей або нанодисперсних ODS сталей. Основу такої сталі складає порошок «Єврофер», до якого додали десятки долі масового проценту Y_2O_3 [3].

Феритно-мартенситні сталі є основними кандидатами на роль сучасних матеріалів для оболонок реакторів на швидких нейтронах через їхню задовільну стійкість проти радіації і радіаційного розпухання (при високотемпературному опроміненні великими нейтронними потоками в аустенітних сталях і сплавах на основі Ni, Ti, Mo, Zr, Be зароджуються та зростають вакансійні пори, а рухомі міжвузельні атоми переходять на крайові дислокації та межі зерен, що призводить до по-

мітного збільшення обсягу металу – радіаційного розпухання [4]). Одже, ці сталі можуть страждати від повзучості за межами зерен і матриці при температурах вище 550 °С.

Для досягнення мети експлуатації інноваційних реакторних систем при більш високих температурах необхідно розглянути можливість використання ODS сталей. Припускається використання цих сталей для бланкету, що дозволить підвищити робочу температуру до ~850 °С [3, 5, 6]. Бланкет – дуже напружена в тепловому та радіаційному плані система міжнародного термоядерного реактора – ІТЕР, його призначення уловлювати нейтрони з високою енергією, що утворюються при термоядерній реакції, у ньому нейтрони уповільнюються, виділяючи тепло, яке відводиться охолоджувальною системою.

Схематичне зображення розташування матеріалів у термоядерному реакторі зображено на рис. 1.

Оцінка різних (традиційних та альтернативних) способів виробництва, дослідження механічних властивостей та деградації матеріалу внаслідок опромінення широко проводяться як у Китаї, так і в усьому світі (США, Японія, Європейський союз, Україна). Іншою актуальною проблемою для ODS сталей є розробка методів їх нероз'ємного з'єднання зварюванням. Відомо, що зварювальні процеси можуть негативно змінити мікроструктуру, а отже, механічні властивості основного матеріалу. Тому розуміння мікроструктурних змін, спричинених зварюванням, і їх вплив на механічні властивості мають велике значення для підвищення якості отриманого з'єднання.

Шльонський П.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3566-1752>

© П.С. Шльонський, Фенг Гао, 2025

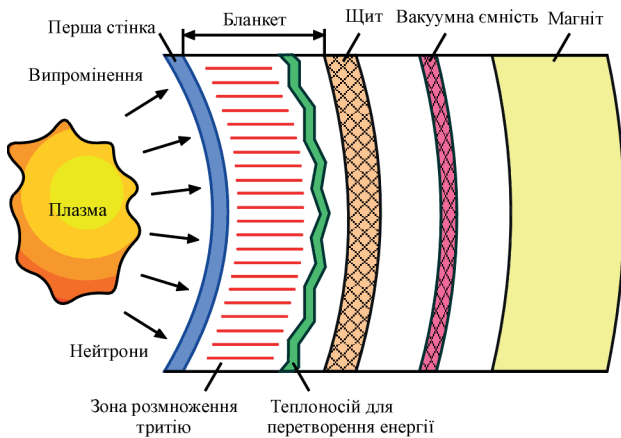


Рис. 1. Схематичне зображення розташування матеріалів у термоядерному реакторі [6]

З'єднання ODS сталей є достатньо складним завданням, оскільки традиційні процеси зварювання плавленням, такі як електронно-променеве зварювання і зварювання неплавким електродом, можуть не тільки змінити характерну мікроструктуру основного матеріалу, але також зруйнувати частинки Y_2O_3 що може вплинути на механічні характеристики матеріалу за високих температур.

Метод зварювання вибухом (ЗВ) – це процес, при якому відсутня необхідність у джерелі тепла, а нероз'ємне з'єднання утворюється завдяки механічній (кінетичній) енергії пластин, що співударяються [7, 8]. Цей спосіб можна зарахувати до «холодних», які не вимагають нагрівання до температури плавлення або близької до неї. Зона термічного впливу при зварюванні вибухом на оптимальних режимах по відношенню до товщин зварюваних пластин мала і становить кілька десятків мікрометрів. Час існування високих температур також малий. Даним методом можна отримувати з'єднання практично будь-яких металів і сплавів між собою або через прошарок з іншого металу.

Тому представляє інтерес провести дослідження можливості використання зварювання вибухом для з'єднання ODS сталей з оцінкою вікна зварюваності.

Запровадження поняття ВЗ є важливим досягненням гідродинамічної теорії [9–11]. Перші уявлення про становище границь ВЗ склалися ще на початку 1970-х років. Значний внесок у дослі-

дження класифікації течій у площині координат « $\gamma-V_k$ » зробили А.А. Дерібас із співробітниками. В рамках гідродинамічного підходу при проектуванні режиму зварювання слід добиватися того, щоб траєкторія робочої точки на площині координат за час процесу ЗВ не виходила з частини ВЗ, яка відповідає режимам утворення якісного з'єднання. Положення меж ВЗ індивідуальне для кожного поєднання металів і встановлюється експериментально.

Для матеріалів з низькою пластичністю і високою міцністю широко використовується на практиці ЗВ з низькотемпературним підігрівом [12]. Вдалим прикладом такого застосування можна вважати [13], в якій описано відпрацювання технології виготовлення біметалічного композиту «швидкорізальна сталь Р6М5 + вуглецева або низьколегована сталі» для інструментального виробництва. В'язко-крихкий перехід найбільш чітко визначався у випробуваннях на ударну в'язкість і відбувався в інтервалі температур 125...175 °С. Тому ЗВ ODS сталі доцільно виконувати з низькотемпературним підігрівом до 200 °С, що ймовірно підвищить її пластичність і яка є нижчою за температуру повного розкладання селітри (210 °С) основного компоненту вибухової речовини.

Метою даної роботи було вперше у світовій практиці дослідити принципову можливість отримання зварного з'єднання ODS сталей між собою за допомогою зварювання вибухом з низькотемпературним підігрівом та оцінити його міцність.

Матеріали та методи досліджень: Для даної роботи використовувалася ODS сталь, виготовлена в Європейському союзі, так звана Eurofer ODS (0,3 ваг. % Y_2O_3), у вигляді гарячекатаного листа 260×225×3 мм, розмір пластин, що вирізалися 100×50 мм. Зразки, для досліджень, були отримані із стрижня та мали форму круглих дисків завтовшки і діаметром відповідно 2 і 50 мм. Хімічний склад та механічні властивості ODS сталі наведені відповідно в табл. 1 та 2.

Металографічні дослідження структури металів після ЗВ проводили за допомогою металографічного мікроскопа ММО-1600 зі збільшенням до ×1600. Фотографії мікроструктури викону-

Таблиця 1. Хімічний склад ODS сталі

Сплав	C	Si	Mn	Cr	V	W	Ta	Y_2O_3
Eurofer	0,12	0,06	0,42	8,87	0,19	1,1	0,14	0,3 або 0,5

Примітка. Інші елементи (мас. %) Nb, Mo, Ni, Cu, Al, Co обмежені значеннями ppm.

Таблиця 2. Механічні властивості ODS сталі

σ_r , МПа	σ_b , МПа	Рівномірне подовження δ , %	Загальне подовження δ , %
1060 ± 45	1135 ± 50	3,2 ± 0,3	12,8 ± 0,9

вали камерою CMOS (фірма «KONUS», Італія) з розеткою USB.

Оскільки диски мають діаметр лише 50 мм, їх було вварено у пластини з нержавкю (рис. 2) (диск, який метається) і вуглецевої сталі (диск, що знаходиться в основі) за допомогою лазерного зварювання. Диски вварювались з метою винесення початкового і кінцевого непровару за їх межі.

На рис. 3 представлені додаткові операції і пристосування для реалізації технології ЗВ з підігрівом. Для нагрівання пластини, яка метається, використовували керамічні інфрачервоні нагрівачі панельного типу німецької компанії Elstein (рис. 3, а). Температуру на поверхні пластини вимірювали за допомогою чотириканального термометра Voltcraft K204 (діапазон вимірювання від -200 до $+1370$ °C) з термопарою К-типу.

З метою зменшення часу на формування заряду коробку для вибухової речовини було виконано з дном (рис. 3, б). Що дозволяло заздалегідь засипати вибухову речовину у коробку і після закінчення нагріву швидко встановити її на поверхню пластини, яка метається. З боків пластин, які зварюються встановлено направляючі стрижні, а з боків коробки прикріплено крила з отворами (рис. 3, б). Таким чином дистанційно забезпечувалось центрування заряду відносно пластин. На рис. 3, в показано коробку з кар-

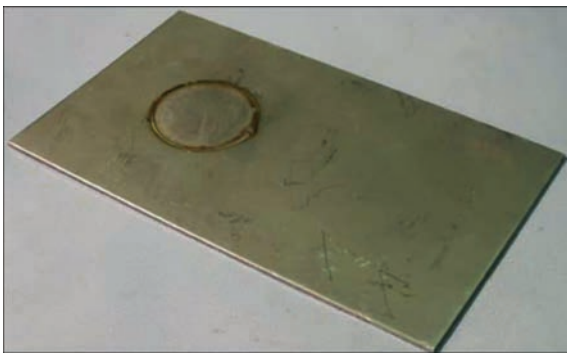


Рис. 2. Диск зі сталі ODS, вварений в пластину з нержавкюї сталі

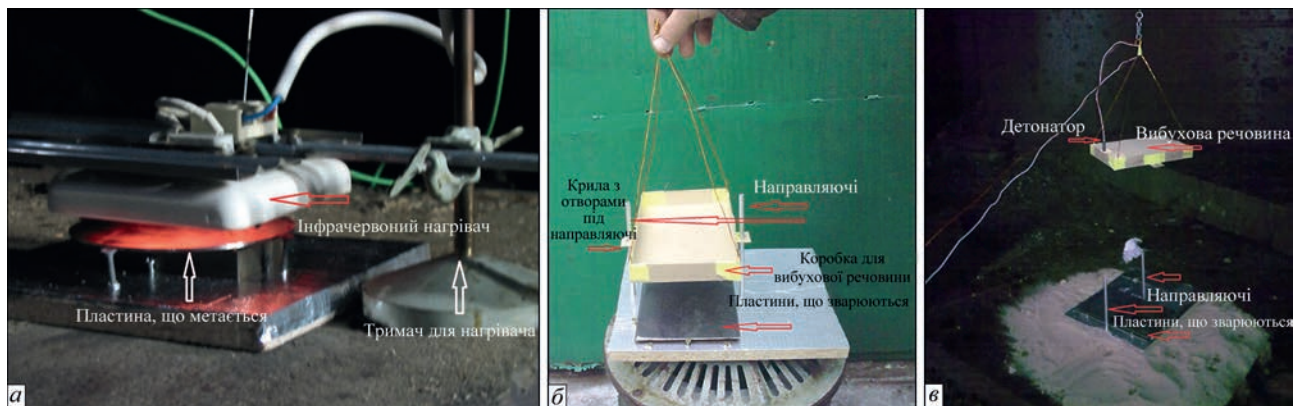


Рис. 3. Додаткові операції при зварюванні вибухом дисків з ODS сталі з низькотемпературним підігрівом: а – нагрів; б – коробка для вибухової речовини із дном і направляючими; в – коробка заповнена вибуховою речовиною, готова до дистанційного встановлення

тону, заповнену вибуховою речовиною і детонатором, яку буде дистанційно опущено на пластини, що зварюються.

З метою визначенні діапазону зварюваності ODS сталі було проведено експерименти з наступними початковими кутами α між пластинами: $-2,00^\circ$, $0,00^\circ$, $+2,00^\circ$ і $+4,00^\circ$ і відповідними цим кутам швидкостями точки контакту V_k (зварювання): 3881,00; 2875,00; 2290,00 і 1904,00 м·с⁻¹. Величина зварювального проміжку становила 4,8 мм. Пластини з ввареними дисками з ODS сталі після ЗВ показано на рис. 4. Дефект у вигляді тріщини, який можна спостерігати на рис. 4, це не дефект ЗВ, диски ODS сталі зварені між собою добре, розшарування відбулось по зоні лазерного зварювання.

Результати експериментів та їх обговорення. Після ЗВ отримані зразки піддавалися металографічним дослідженням. Мікроструктуру зони з'єднання ODS сталі на різних режимах рис. 5, а, з прив'язкою до вікна зварюваності (ВЗ) показано на рис. 5, б.

Ліву частину вікна зварюваності представлено зображенням мікроструктури № 1, 2. Там спостерігаються дуже великі деформації зсуву, або майже без хвиль (№ 1), або з довгими хвилями на межі розділу між дисками ODS сталі (№ 2).

Регулярні хвилі з амплітудою приблизно 100 мкм та відсутність розплавів на зображенні мікроструктури № 3 вказують, що саме на цьому режимі реалізуються найкращі умови для ЗВ ODS сталі.

На зображенні мікроструктури № 4 видно, амплітуда хвиль стає меншою порівняно з № 3. Це тому, що швидкість точки зіткнення зросла приблизно до 4000 м/с і внаслідок виділення тепла при високій швидкості зварювання починають утворюватися завихрення, так звані «кишені».

Таким чином, можна сказати, що оптимальна швидкість детонації для зварювання ODS сталі

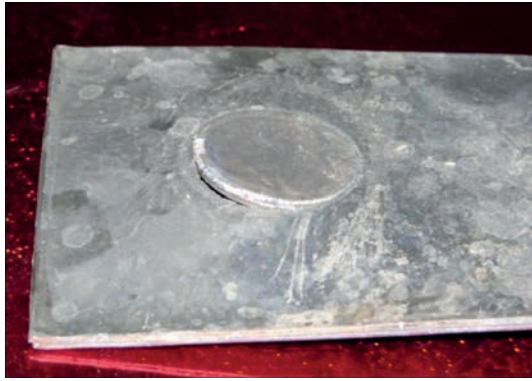


Рис. 4. Пластини з звареними дисками з ODS сталі після ЗВ становить $2875 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, а зварювальний проміжок 4,8 мм, це забезпечує швидкість співударання близько $750 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

На зображенні мікроструктури № 4 можна бачити відмітки після вимірювання мікротвердості поблизу зони з'єднання та в «кишенях». Значення мікротвердості, тим не менш, близькі: 440 HV поблизу межі розділу і 420 HV в «кишенях».

Після проведених досліджень на зразках із дисками було виконано зварювання пластин із ODS сталі розміром $100\times 50\times 3 \text{ мм}$. ЗВ виконувалось із підігрівом до $200 \text{ }^\circ\text{C}$, режим зварювання був наступним: висота вибухової речовини – 40 мм; зварювальний проміжок – 4 мм. У результаті вдалося успішно зварити пластини між собою і отримати зразок який показано на рис. 6. З отриманого зразка вирізалась ділянка (на рис. 6 показано місце) для вивчення мікроструктури зони з'єднання.

Зображення мікроструктури ODS сталь + ODS сталь показано на рис. 7. Після травлення пікриновою кислотою поперечний переріз зразка має

типову для ЗВ хвилясту форму на межі розділу та світлі включення (позначено червоними стрілками). Енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (EDX) (рис. 8) показала, що ці включення є силікатами (табл. 3). Місця проведення аналізу EDX позначені стрілками і цифрами.

Можливим поясненням наявності силікатів на поверхні між пластинами є те, що внаслідок невеликої довжини пластин, які зварюються, не відбулось повного очищення поверхонь кумулятивним струменем. Вивчення впливу цих включень на механічні властивості матеріалу, звареного вибухом, і наявність силікатів в наступних зразках представляє інтерес для подальших досліджень.

Оскільки ЗВ ODS сталі виконували з низькотемпературним підігрівом, то цікаво теоретично оцінити температуру, яка буде у зоні формування з'єднання, і перевірити його міцність на відрив.

При ЗВ нагрівання шарів металу, що прилягають до поверхні контакту, здійснюється за декількома механізмами [8]:

- великі деформації пластичного зсуву поверхневих шарів;
- захоплення кумулятивного потоку (так званого «зворотного струменя») при зварюванні в режимі з утворенням хвиль [7, 14];
- нагрів від ударно стисненого повітря в зварювальному зазорі.

У нашому випадку істотні два перші механізми, оскільки довжина заготовок невелика.

Ступінь нагрівання залежить від вибору режиму ЗВ. Нагрів від зсувних деформацій присутній завжди, але в розглянутому випадку ЗВ з утво-

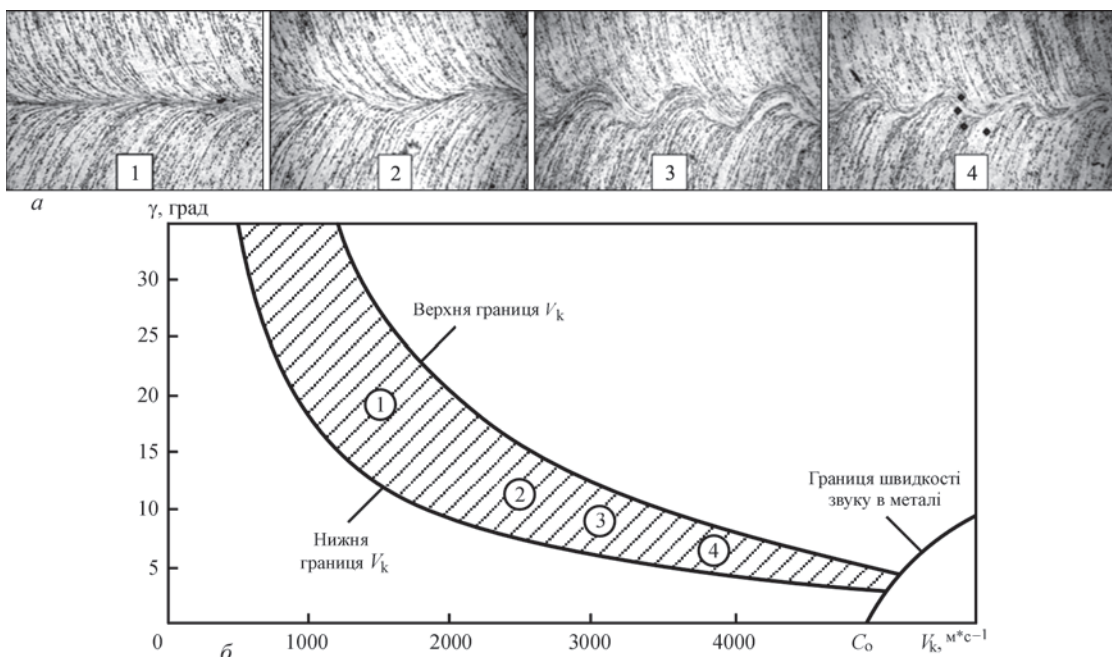


Рис. 5. Мікроструктури зони зварювання дисків з ODS-сталі при різних режимах ЗВ (а), з прив'язкою до ВЗ (б), $\times 200$: 1 – $\alpha = +4,00^\circ$, $V_k = 1904,00 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; 2 – $\alpha = +2^\circ$, $V_k = 2290 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; 3 – $\alpha = 0,00^\circ$, $V_k = 2875 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; 4 – $\alpha = -2^\circ$, $V_k = 3881,00 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$

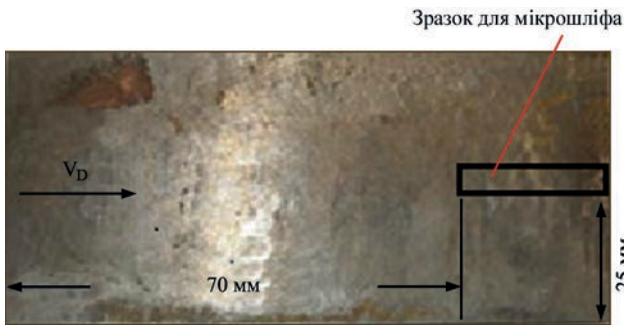


Рис. 6. Зразок ODS сталь + ODS сталь, отриманий ЗВ



Рис. 7. Мікроструктура зони ЗВ пластин з ODS сталі

ренням хвиль його інтенсивність підвищена через наявність тангенціальної компоненти V_t швидкості зіткнення поверхонь. Чим більше V_t , тим більше зсувні деформації і нагрівання. Тому величини компоненти V_t і інтенсивність нагріву циклічно змінюються з періодом, рівним довжині хвилі.

Пластичні деформації зсуву за рахунок V_t і захоплення кумулятивного потоку відповідають за утворення розплавів у т.з. «кишенях». Обсяг вмісту вихрових зон зростає в міру віддалення режиму від нижньої межі ВЗ, і в міру наближення до верхньої межі розплави можуть утворювати суцільний шар, що позбавляє з'єднання міцності. При цьому, чим більше відносно подовження зварювального зазора (відношення його довжини до ширини), тим більша частка кумулятивного потоку виявляється захопленою у вихрові зони. У нашому випадку (ODS + ODS) чітко виражених вихорів ще немає, але на мікрошліфах вже видно досить значні зони розплаву (світлі) (рис. 7).

На даний час відсутні методики інженерного розрахунку теплових полів при ЗВ (тим більше, в режимі з хвилеутворенням). Відома методика експериментального визначення теплових полів, що вимагає вимірювань полів пластичних деформацій у зразках, набраних із шарів металу. Ця методика, розроблена у Волгоградському державному технічному університеті, громіздка у виконанні та коштовна, тому використовується рідко.

Існуючі уявлення про інтенсивність нагріву в тих режимах ЗВ, які використані в наших дослідженнях, зводяться до наступного. Зварювані пластини можна умовно розбити за товщиною на три зони:

- прилегла до поверхні контакту зона формування з'єднання (ЗФЗ), товщина якої приймається рівною амплітуді зварювальних хвиль;
- перехідна зона того ж порядку товщини, що і ЗФЗ;
- основний шар пластини.

Товщина двох перших зон, разом узятих, на порядок менше товщини пластин, які зварюються (у нашому випадку вони займають приблизно 12...15 % товщини). Основний обсяг пластини в процесі ЗВ прогрівається на десятки °С. Вирівнювання температурного поля у звареному зразку в цілому займає десятки мікросекунд. Температура пластини, що метається, та приконтатної зони після вирівнювання може досягати 100 °С за умови відсутності попереднього підігріву.

Температура ЗФЗ досягає максимуму на контактній поверхні. У нашому випадку на деяких ділянках контактної поверхні вона досягає температури плавлення. Середня температура ЗФЗ для звичайних металів може становити 550...750 °С. У нашому випадку високошвидкісного металу і досить високих швидкостей метання пластини (750 м/с) та детонації (2850 м/с) вона, ймовірно, може становити 800...900 °С.

Максимальна температура, що досягається в перехідній зоні, змінюється за її товщиною для звичайних металів у межах від 100 до 200...400 °С,

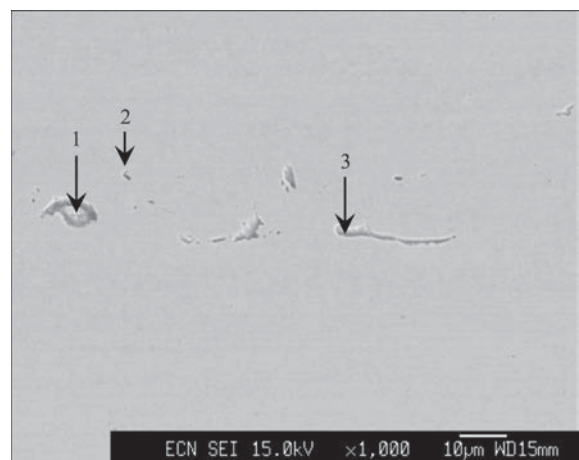


Рис. 8. Місця проведення аналізу EDX на зразку позначені стрілками та цифрами

Таблиця 3. Результат EDX аналізу

Розташування	Хімічний склад, масова частка %						
	W	Si	Ca	V	Cr	Mn	Fe
Основний метал	1,0	0,1	–	0,2	9,3	0,6	88,8
Точка 1 на рис. 8	0,9	0,3	–	–	9,7	–	89,1
Точка 2 на рис. 8	–	4,6	–	0,7	13,1	–	81,6
Точка 3 на рис. 8	–	7,1	0,5	–	9,0	–	83,3

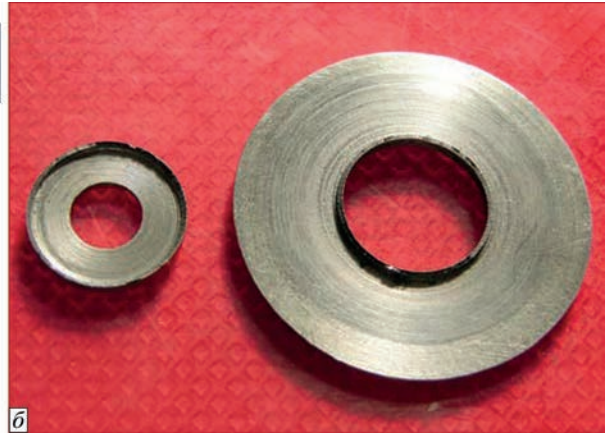
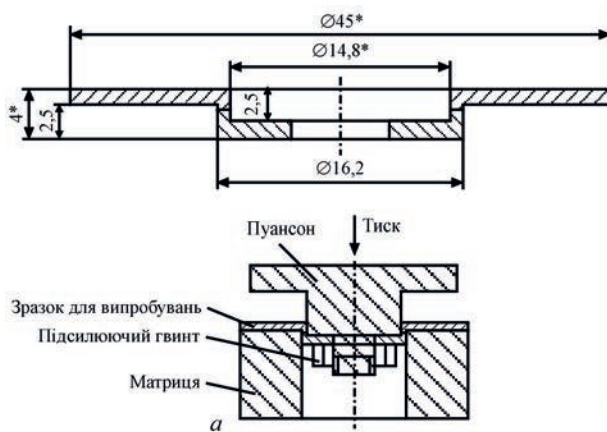


Рис. 9. Схема зразка і вузла для випробувань на відрив ODS сталі (а) та вигляд зразків з ODS сталі після випробувань (б)

у нашому випадку, можливо, до більш високої температури.

Таким чином, можливо припустити, що попередній підігрів до 200 °С пластин з ODS сталі, які зварюються вибухом, не буде надавати істотного впливу на їх механічні властивості після ЗВ.

Проведені випробування міцності на відрив для ODS сталей, які зварені вибухом за схемою, зображеною на рис. 9, а. На рис. 9, б зображено зразок після випробувань на відрив. Міцність на відрив для ODS сталей, які зварені вибухом на режимі № 3, склала 851 МПа, що становить 75 % від міцності основного металу. Міцність на режимі № 2 склала лише 534 МПа. Таким чином, хоча на зображенні мікроструктури № 2 (рис. 5) у зоні з'єднання ми спостерігаємо довгі хвилі невеликої амплітуди, що свідчить про наявність зварного з'єднання, його міцність становить близько 50 % від міцності основного металу.

Висновки

1. Проведені дослідження та розробки показали, що зварювання вибухом ODS сталі до монет ODS має широке вікно зварюваності – в рамках швидкості точки зіткнення – від 2000 до 4000 м/с. Найвища міцність з'єднання, яку вдалося досягти для ODS сталі, складає 75 % від міцності основного металу.

2. Надзвичайно висока міцність і низька пластичність ODS сталі потребує проведення попереднього низькотемпературного підігріву (до 200 °С) пластини, яка метається, а також використання режимів зварювання з підвищеною швидкістю точки контакту у порівнянні зі звичайними сталями.

3. Структура ODS сталі є досить привабливою для дослідження високошвидкісної деформації та механізму зварювання вибухом, тому розвиток подальших науково-дослідних і конструкторських робіт є досить цікавим та перспективним.

Список літератури

1. Азаренков Н.А., Воеводин В.Н., Кириченко В.Г., Ковтун Г.П. (2020) Наноструктурные материалы в ядерной энергетике. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна*, **887**, 4–24.
2. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Пирайнен В.Ю. (2004) *Радиационно-стойкие материалы*. Специальные материалы в машиностроении учебник для студ. вузов машиностроит. и общетехн. спец. СПб. Москва, Химиздат.
3. Esteban, G.A., Peca, A., Legarda, F., Lindau, R. (2007) Hydrogen transport and trapping in ODS-EUROFER. *Fusion Engineering and Design*, **82**, 2634–2640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.02.002>
4. Кириченко В.Г., Литовченко С.В. (2012) *Металлография и металловедение сталей. 1. Сплавы и наноматериалы в ядерной энергетике. Учебное пособие. ХНУ им. В.Н. Каразина*.
5. Компаниец Т.Н. (2009) К проблеме выбора сталей для реактора демо. *Вопросы атомной науки и техники серия термоядерный синтез*, **3**, 16–24.
6. Suri, A.K., Krishnamurthy, N., Batra, I.S. (2008) Materials issues in fusion reactors. *Journal of Physics: Conference Series, 23rd National Symposium on Plasma Science & Technology (PLASMA-2008) 10–13 December 2008, Mumbai, India*, **208**, 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/208/1/012001>.
7. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. (1978) *Сварка взрывом в металлургии*. Москва, Металлургия.
8. Лысак В. И., Кузьмин С. В. (2005) *Сварка взрывом*. Москва, Машиностроение.
9. Loyer, A., Hay, D.R., Cagnon, G. (1975) Weldability windows and the selection of explosive welding process parameters. *5th Intern. conf. «High energy rate fabrication», Denver, Colorado, S. l., s. a., 4.3.1.-4.3.14*.
10. Petushkov, V.G., Simonov, V.A., Sedykh, V.S., Fadeenko, Yu.I. (1997) *Welding and surfacing reviews*, **3**, (4), Explosion welding criteria, Harwood, Harwood Academic Publishers.
11. Дерибас А.А. (1973) Классификация течений, возникающих при косых соударениях металлических пластин. *II Междунар. симп. «Использование энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами»*, Сб. тез. докл., Пардубице, (1), 28-43.
12. Добрушин Л.Д., Илларионов С.Ю., Шлёнский П.С., Фадеев Ю.И. (2010) Сварка взрывом с умеренным подогревом (краткий обзор). *Известия Волг. ГТУ*, **5**, 63–65.
13. Беляев В.И., Бусел Н.А., Кравцов В.Б. (1983) Применение энергии взрыва для получения биметаллического режущего инструмента на основе быстрорежущей стали. *Применение энергии взрыва в сварочной технике*. Киев, Изд. ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 86–88.
14. Cowan, G., Holtzman, A. (1963) Flow configuration in colliding plates. *J. of Applied Physics*, **34** (4), 928–939.

References

1. Azarenkov, N.A., Voevodin, V.N., Kirichenko, V.G., Kovtun, G.P. (2010) Nanostructured materials in nuclear power engineering. *Visnyk KhNU*, **887(1/45)**, 4–24 [in Russian].

2. Solntsev, Yu.P., Pryakhin, E.I., Pirainen, V.Yu. (2004) Radiation-resistant materials. *Special materials in mechanical engineering: Manual*. St.-Pt., Moscow, Khimizdat, 321–336 [in Russian].
3. Esteban, G.A., Peca, A., Legarda, F., Lindau, R. (2007) Hydrogen transport and trapping in ODS-EUROFER. *Fusion Engineering and Design*, 82, 2634–2640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.02.002>
4. Kirichenko, V.G., Litovchenko, S.V. (2012) *Metallography and metals science of steels. 1. Alloys and nanomaterials in nuclear power engineering*: Textbook. KhNU, 70 [in Russian].
5. Kompaniets, T.N. (2009) On the problem of steel selection for the demo reactor. *Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki*, 3, 16–24 [in Russian].
6. Suri, A.K., Krishnamurthy, N., Batra, I.S. (2008) Materials issues in fusion reactors. *J. of Physics: Conf. Series, 23rd National Symposium on Plasma Science & Technology (PLASMA-2008)*, 10–13 December, Mumbai, India, **208**, 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/208/1/012001>
7. Kudinov, V.M., Koroteev, A.Ya. (1978) *Explosion welding in metallurgy*. Moscow, Metallurgiya, 168 [in Russian].
8. Lysak, V.I., Kuzmin, S.V. (2005) *Explosion welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
9. Loyer, A., Hay, D.R., Cagnon, G. (1975) Weldability windows and the selection of explosive welding process parameters. In: *5th Intern. Conf. on High Energy Rate Fabrication*, Denver, Colorado, 4.3.1.–4.3.14.
10. Petushkov, V.G., Simonov, V.A., Sedykh, V.S., Fadeenko, Yu.I. (1997) *Welding and Surfacing Reviews*. Ed. by B.E. Patton. Harwood: Harwood Academic Publishers, Vol. 3, Pt. 4: Explosion Welding Criteria, 127.
11. Deribas, A.A. (1973) Classification of flows arising during oblique collisions of metal plates. In: *Abstr. of Papers of II Int. Symp. on Use of Explosion Energy for Production of Metal Materials with New Properties*, Marianske Lazne, Czechoslovakia, October 9–12, Pardubice, 1974, Vol. 1, 28–43 [in Russian].
12. Dobrushin, L.D., Illarionov, S.Yu., Shlenskiy, P.S., Fadeenko, Yu.I. (2010) Explosion welding with moderate preheating (Brief review). *Izvestiya VolGTU*, 5, 63–65 [in Russian].
13. Belyaev, V.I., Busel, N.A., Kravtsov, V.B. (1983) Application of explosion energy for obtaining a bimetallic cutting tool based on high-speed steel. In: *Application of explosion energy in welding equipment*, 86–88 [in Russian].
14. Cowan, G., Holtzman, A. (1963) Flow configuration in colliding plates *J. of Applied Physics*, 34(4), 928–939.

FEATURES OF EXPLOSION WELDING OF FAST NEUTRON REACTOR SHELLS

P.S. Shlonskiy, Feng Gao

Liaoning Xin Huayang Weiye Equipment Manufacturing company Ltd №1 Road, Tieling high-tech industrial development zone, Liaoning province, China. e-mail: pshlonsk@hmtclad.com

The possibility of explosion welding of plates and disks made from low-ductility oxide dispersion-strengthened steel was studied. In order to prevent appearance of cracks on the surface of the plates, low-temperature (up to 200°C) heating was applied to the flyer plate. In a wide range of explosion welding parameters with reference to the weldability window, the microstructure of the resulting joint is shown for 2 mm thick and 50 mm diameter discs that were laser welded into carbon and stainless steel plates. A tensile strength test of the produced joints was conducted. It was possible to achieve a joint strength of 75 % of the strength of the base metal. Explosion welding of 100x50x3 mm plates was performed; the joint zone boundary has a wavy shape typical for explosion welding. The chemical composition of inclusions in the joint zone was determined, using energy dispersive X-ray spectroscopy, and it was established that silicates are present in the joint zone. It is shown that application of low-temperature heating allows welding plates from ODS steel using the explosion energy. 14 Ref., 3 Tabl., 9 Fig.

Keywords: ODS-steel, explosion welding, weldability window, low-temperature heating, microstructure

Отримано 25.09.2024

Отримано у переглянутому вигляді 14.10.2024

Прийнято 25.12.2024

ПЕРЕДПЛАТА 2025

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.				
	місяць	два місяця	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 3041-2374 (Print). ISSN 3041-234X (Online). Передплатний індекс 70031	–	300	–	900	1800
«Сучасна електрометалургія», видається з 1975 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-238 (Print). ISSN 3041-2331 (Online). Передплатний індекс 70693	–	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-2366 (Print). ISSN 3041-2358 (Online). Передплатний індекс 74475	–	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X (Print). ISSN 3041-2293 (Online). Передплатний індекс 21971.	600	1200	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогам передплатних агентцій «УКРПОШТА», «Прес Центр», «Меркурій» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів. Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf.

На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2023 рр.

Адреса видавництва

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Тел.: (38044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com